

ПЕРЕВАГИ МАТРИЧНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ У БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШАХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛУРГІЙНИХ БРИКЕТІВ

Волошин В.С.

Приазовський державний технічний університет
вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com

В роботі розглянуто переваги методики прогнозування властивостей та створення багатокомпонентних сумішей з числа основних металургійних відходів, для вторинного використання в металургічних процесах, за допомогою моделей багатовимірних матриць суміжності і клітинних даних про термодинамічні показники таких сумішей. Надано аналіз переваг та недоліків низці теоретичних та експериментальних досліджень, які підтверджують ефективність запропонованої методики. У додаток до існуючої методики запропонований механізм Бассової аналітики, який надає можливостей отримання фізично обґрунтованих знань про властивості таких систем за рахунок поєднання фізичних та статистичних закономірностей, забезпечення аналітичної мультиоб'єктивності, урахування структурних кореляцій на рівні спектральних ознак ентропійної матриці, а також за рахунок цього дозволяє виявляти вплив міжкомпонентних кореляцій на кінцеву функцію $f(x) = Q$, що унеможливується при простих ознаках. Показано, що існуючі в зарубіжній науковій літературі дані по оптимальним сумішам, що отримують з металургійних відходів, можуть мати поліпшені варіанти, за рахунок підвищення рангу аналізованої матриці суміжності та розширеного спектру можливих сумішей. Показано, що запропонований метод є потужним, теоретично обґрунтованим і практично перспективним інструментарієм для оптимізації багатокомпонентних сумішей щодо отримання металургійних брикетів. За умови точного отримання вхідних даних ентропії, розумного стиснення параметрів (низькорангові представлення), параметризації температури та інтеграції з експериментальним дизайном, метод пропонує значні переваги над «чисто емпіричним» підходом: зменшення кількості експериментів, підвищення відтворюваності, кількісне інтерпретування взаємодій і можливість багатокритеріальної оптимізації. Накопичений досвід впровадження методики свідчить, що її, в різних модифікаціях і в залежності від встановлених цілей та завдань, можна ефективно використовувати як попереднє дослідження для подальших об'єктивних багатofакторних експериментів і завдань, де кожен тест є дорогим і трудомістким. *Ключові слова:* металургійні відходи, матриця суміжності, Бассівські мережі, металургійні суміші, брикети, оптимальні системи, термодинамічні показники.

Advantages of the matrix method of studying the properties of metallurgical waste in multicomponent mixtures for the production of metallurgical briquettes. Voloshyn V.

This work examines the advantages of a methodology for predicting the properties and designing multicomponent mixtures derived from major metallurgical residues for their secondary use in metallurgical processes. The approach is based on multidimensional adjacency-matrix models and cell-level thermodynamic data describing the behaviour of such mixtures. An analysis is provided of the benefits and limitations of a number of theoretical and experimental studies that confirm the effectiveness of the proposed methodology. As an extension of the existing framework, a Bayesian analytics mechanism is proposed. This mechanism enables the extraction of physically justified knowledge regarding the properties of these systems by combining physical and statistical regularities, ensuring analytical multi-objectivity, incorporating structural correlations at the level of spectral features of the entropy matrix, and, consequently, revealing the influence of intercomponent correlations on the final objective function $f(x) = Q$, which cannot be detected using simple features. It is shown that the existing results in the international scientific literature regarding optimal mixtures obtained from metallurgical waste may be further improved by increasing the rank of the analysed adjacency matrix and by expanding the spectrum of potential mixture configurations. The analysis demonstrates that the proposed method is a powerful, theoretically grounded, and practically promising tool for optimizing multicomponent mixtures intended for the production of metallurgical briquettes. Provided that input entropy data are obtained with sufficient accuracy, along with appropriate parameter compression (low-rank representations), temperature parameterization, and integration with experimental design, the method offers substantial advantages over a “purely empirical” approach: a reduced number of experiments, improved reproducibility, quantitative interpretability of interactions, and the possibility of multi-criteria optimization. Accumulated experience with the implementation of the methodology indicates that, in its various modifications and depending on the defined goals and tasks, it can be effectively used as a preliminary analytical stage prior to objective multifactor experiments and tasks in which each individual test is costly and labour-intensive. *Key words:* metallurgical waste, adjacency matrix, Bayesian networks, metallurgical mixtures, briquettes, optimal systems, thermodynamic indicators



Постановка проблеми. Проблеми мінімізації промислових відходів, незважаючи на їхню актуальність і величезну кількість методів і способів досягнення, залишаються невирішеними і потребують додаткових підходів та теоретичного обґрунтування.

Актуальність дослідження. В умовах, когда металлургические отходы занимают большие земельные ареалы на планете и постоянно увеличиваются в объемах, проблема их переработки, приведения к состоянию товарной продукции в любых доступных проявлениях, является одной из актуальных задач для прикладных наук в области техники защиты окружающей среды.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Підсумки Базельської конвенції 2024 та World Circular Economy Forum-2024 в Брюсселі надають нові шляхи в напрямку переробки принципово нових сучасних промислових відходів, сприяли впровадженню циклічних моделей економіки і пошуку нових методів управління відходами, що є темою цих досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років група авторів розробила та на практичних експериментах підтвердила ефективність методики прогнозування властивостей багатокомпонентних сумішей за допомогою моделей багатовимірних матриць суміжності [1]. На цей час методика випробувана в технологіях отримання металургійних брикетів, виробництві геополімерів [2], виробництві хліба [3], дорожньому будівництві, тобто там, де похідними результатами повинні бути багатокомпонентні суміші. Джерелом такої переваги є простота та очевидність методики, універсальність термодинамічних показників, що надають можливостей для уніфікованого розгляду явно неспівставних показників якості кінцевої продукції. В сучасній літературі надаються експериментальні дані щодо пошуку оптимальних співвідношень вихідних компонентів – металургійних відходів у підсумковій суміші [4, 5, 6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Розроблені методи вирішення питання про створення ефективних металургійних сумішей для отримання металургійних брикетів мали знайти своє підтвердження, в порівнянні з існуючими в літературі та на практиці, варіантами за об'єктивними інтегральними критеріями ефективності.

Новизна. Розроблена математична модель багатовимірних матриць для аналізу та прогнозування необхідних властивостей для багатокомпонентних металургійних сумішей, має розвиток в сторону евристичних та статистичних методів, що суттєво уточнюють методологію аналізу.

Методологічне або загально-наукове значення. Методологія аналізу несумісних по показникам складних систем за допомогою багатовимірних

матриць суміжності має більш широке значення для багатьох виробництв, які мають справу з компонентними сумішами.

Викладення основного матеріалу. Коротко представимо метод оцінки якості сумішей для виробництва металургійних брикетів за допомогою багатовимірних матриць суміжності [1]. Багатокомпонентна суміш $b_{p,q,r,t}$ ($p=1,1,P; q=1,1,Q; r=1,1,R; t=1,1,T; p \neq Q \neq R \neq T$) подається як набір початкових b_i компонентів із обраною для аналізу лінійки металургійних відходів, на основі яких будується багатовимірна матриця (тензор) суміжності, у клітинах якої на перетині певних наборів компонентів фіксуються оцінки ентропії цієї суміші або змінення ентропії під час переходу від окремих компонентів до їхньої суміші. Загальна (комплексна) ентропія суміші інтерпретується як сума кількох типів ентропії (конфігураційна, хімічна, сумішна, вібраційна та конструктивна, тощо), кожна з яких показує свій внесок у фінальний індикатор. Сумарна ентропія системи розраховується як

$$S_{p,(q,r,t,\dots)}^{total} = \sum x_{p,(q,r,t,\dots)} S_{p,(q,r,t,\dots)}^{comp} + (\Delta S_{mix} + S_{surf} + S_{conf} + S_{chem} + S_{proc})_{p,(q,r,t,\dots)} \quad (1)$$

де: $x_{p,(q,r,t,\dots)}$ – кількісна частка p , (q, r, t, \dots)-го компонента; $S_{p,(q,r,t,\dots)}^{comp}$ – питома (по молярній масі) ентропія чистого компонента системи при заданих норм. умовах (термодинамічна, як внесок внутрішніх ступенів свободи); ΔS_{mix} – зміна ентропії об'єднання компонентів (ідеал + надлишок); S_{surf} – внесок ступенів свободи на взаємодіючих поверхнях розділу компонентів (залежить від конкретної поверхні, зв'язаних і вільних компонентів); S_{conf} – конфігураційна ентропія взаємного розташування компонентів (структурна неоднорідність, щільність упаковки окремих компонентів) в системі; S_{chem} – ентропійні зміни, пов'язані з хімічними реакціями взаємодії між окремими компонентами системи (розкладання, окислення, відновлення, утворення нових фаз); S_{proc} – процес-кінетичний внесок до системи у вигляді нерівноважних ефектів при деформації, температурній дії (включаючи «похідні ентропії» від розподілу швидкості зміни температури) відносно окремих компонентів системи. Можливі й інші, не менш актуальні складові повної ентропії в залежності від змісту отриманої системи.

Багатовимірною матрицею суміжності має загальний вигляд $P \times Q \times R \times T \times \dots$, где $P=Q=R=T=\dots$. Кожна клітинка матриці суміжності має вигляд $b_{p,q,r,t,\dots}$ где $p=1,1,P; q=1,1,Q; r=1,1,R; t=1,1,T; \dots$. Для кожної такої клітинки матриці надається розрахункове значення ентропії у вигляді виразу

$$S_{(p,q,r,t,\dots)}^{total} = \sum_{i=1}^N S_{(p,q,r,t,\dots)}^i, \text{ де кожна } i\text{-а складова є незалежною друг від друга та приймає значення від } S_{(p,q,r,t,\dots)}^{min} \text{ до } S_{(p,q,r,t,\dots)}^{max}.$$

У першій частині задачі на оптимізацію суміші необхідно знайти рішення, яке дозволить визначити клітинку $b_{p,q,r,t,\dots}^*$ для якої була б виконана умова: один із членів ентропії $S_{(p,q,r,t,\dots);i}$ цієї клітинки (i – аскадова), буде найменшим за термодинамічними показниками серед тих самих членів інших клітинок заданої матриці суміжності, щоб визначити координати цієї клітинки та показати для неї значення $S_{(p,q,r,t,\dots);i}$.

Другу частину задачі потрібно розв’язати так, що один із компонентів ентропії $S_{(p,q,r,t,\dots);i}$ (i – аскадова) для клітинки $b_{p,q,r,t,\dots}^{**}$ буде найбільшим серед тих самих компонентів інших клітин заданої суміжної матриці за обраним термодинамічним показником.

Множина всіх мінімізуючих індексів визначається як

$$\mathcal{M}_i^{min} = \arg \min_{\alpha \in \mathcal{I}} S_{\alpha}^i = \left\{ \alpha \in \mathcal{I} \mid S_{\alpha}^i = \min_{\beta \in \mathcal{I}} S_{\beta}^i \right\}. \quad (2)$$

І множина усіх максимізуючих індексів

$$\mathcal{M}_i^{max} = \arg \max_{\alpha \in \mathcal{I}} S_{\alpha}^i = \left\{ \alpha \in \mathcal{I} \mid S_{\alpha}^i = \max_{\beta \in \mathcal{I}} S_{\beta}^i \right\}. \quad (3)$$

Показником ефективності таких систем в їх термодинамічних обмірах пропонується агрегований індекс якості $f(x) = Q [0 \div 1]$

$$Q = \lambda_1 I_{mix} + \lambda_2 I_{dens} + \lambda_3 I_{hom}, \quad (4)$$

де вагові коефіцієнти λ_i складаються до 1, експериментально або експертно. Тут I_{dens} – потенціал міцності, щільність обернено залежна від небажаних внесків ентропії; I_{mix} – позитивна роль ідеальної ентропії змішування $\Delta S_{mix,ideal}$ (чим вище, тим краще хімічна однорідність та можливість реакції) нормалізується до максимально можливої для даного числа компонентів; I_{hom} – показник однорідності суміші за хімічним складом і фракціонуванню.

Така формалізована модель використовується для ранжування та вибору можливих формулювань сумішей перед експериментом. Анотація моделі може розглядатися як явна формула для інтерпретації та подальшої роботи наступного змісту.

Позначимо масові (або молярні) частки кожного з компонентів b_p як x_p . Тоді ми можемо представити, наприклад, зміну ентропії суміші як термодинамічне розширення, що складається з комірок послідовних двох- трьох- та чотирьохвимірних матриць суміжності:

$$\Delta S_{mix}(x) = \sum x_p S_p^0 + \sum_{p < q} x_p x_q \Delta S_{p,q} + \sum_{p < q < r} x_p x_q x_r \Delta S_{p,q,r} + \dots \quad (5)$$

де S_p^0 – вклад чистого b_p – го компонента (питома ентропія), $\Delta S_{p,q}$ – парний внесок (записується в матриці суміжності), $\Delta S_{p,q,r}$ – потрійний внесок (клітинки 3-вимірного тензору) и т.д. На практиці можливо обмежити члени матриці порядком p, q, r, t , тобто чотирикомпонентними сумішами, якщо вищі сили не ідентифікуються за даними.

Подальші обчислювальні та статистичні методи для вдосконалення моделі можуть дозволити розширити її можливості за ради отримання оптимальних за якістю металургійних сумішей. Зокрема, алгоритм системи «CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) + ентропійні багатовимірні матриці суміжності + Баєсівська оптимізація» для ефективно оцінки й оптимізації багатоконпонентних сумішей (металургійні відходи → суміші → брикети) означає поєднання фізико-термодинамічного моделювання (CALPHAD) для обчислення енергетичних та ентропійних характеристик композицій металургійних відходів, представлення їх характеристик у вигляді чисельних ознак (включно з властивостями ентропійної багатовимірної матриці суміжності, дозволяє мінімізувати кількість дорогих експериментів для знаходження композицій підсумкових сумішей з оптимальними термодинамічними показниками.

Позначимо: $x \in \mathcal{S} \subset \mathbb{R}^d$ – вектор параметрів складу суміші (долі вихідних компонентів з числа металургійних відходів (можливо додаткові параметри: температура плавлення, розмір частинок тощо); $f(x)$ – цільова функція якості суміші, яку ми хочемо мінімізувати/максимізувати; в нашому випадку це функція від термодинамічних показників (наприклад, комбінований скаляр):

$$f(x) = w_1 \cdot S_{mix}(x) + w_2 \cdot \Delta S(x) + w_3 \cdot \Phi_{phases}(x) + \dots \quad (6)$$

де $S_{mix}(x)$ – змішувальна (конфігураційна) ентропія, ΔS – зміна ентропії при процесі брикетування/плавленні, $\Phi_{phases}(x)$ – штрафи за небажані фази (σ , інтерметаліди) через CALPHAD; w_i – ваги, що задаються експертом або автоматично нормуються.

Баєсівська аналітика надає можливостей отримання фізично обґрунтованих знань за рахунок поєднання фізичних та статистичних закономірностей, забезпечення аналітичної мультиоб’єктивності (оптимізація по декільком критеріям), урахування структурних кореляцій на рівні спектральних ознак ентропійної матриці дозволяють виявляти вплив міжкомпонентних кореляцій на кінцеву функцію $f(x)$, що унеможливується при простих ознаках.

Варіанти потенційних розширень математичної моделі багатовимірних суміжних матриць для подальших досліджень властивостей багатоконпонентних сумішей з металургійних відходів включають пропонувану формулу цільової функції (скалярний варіант)

$$f(x) = \alpha_1 \underbrace{\frac{S_{mix}(x) - S_{mix}^{opt}}{S_{scale}}}_{\text{ентропійна відстань}} + \alpha_2 \parallel \underbrace{\{\text{небажані фази}\}}_{\text{штраф за фази}} + \alpha_3 \underbrace{\frac{\Delta G_{liquid-solidus}(x)}{G_{scale}}}_{\text{термодин. стабільність}} + \alpha_4 Cost(x) \quad (7)$$

Тут α_i – нормовані ваги. Індикатор \parallel можна зробити м’яким (penalty continuous) через величину вмісту фази.

Ідея використання такої моделі науково обґрунтована і вельми корисна, оскільки вона відображає природу багатofакторних взаємодій у багатofакторних системах з заздалегідь неспівставними параметрами. У металургійних сумішах властивості брикету (міцність, пористість, реактивність, плавна поведінка) часто визначаються не сумою властивостей окремих компонентів, а їхніми взаємодіями (парними та вищих порядків). Індикатори ентропії в матричній моделі точно кодують статистичний і структурний бік таких взаємодій. Загалом, наступні характеристики моделі помітні.

1. Запропонована математична модель дозволяє формалізувати різні властивості багатofакторних систем, включаючи їхні нелінійні ефекти, за допомогою уніфікованих термодинамічних індикаторів, які однозначно інтерпретують властивості таких систем. Запис парних, потрійних і чотирьохкомпонентних членів у матриці (тензорі) еквівалентний урахуванню взаємних кореляцій і синергій (або можливих антагонізмів), які неможливо адекватно виконати «наочно» шляхом емпіричного відбору або внаслідок дорогого експерименту.

2. Ця методика дозволяє суттєво зменшити обсяг дорогих експериментів. За наявності правильної моделі та достатньої кількості вхідних даних можна відкинути очевидно «погані» розкладки і зосередитися на перспективних областях композиційного простору.

3. Забезпечує відтворюваність і портативність знань через нормальну матрицю (тензор), яка є машинозчитуваним записом взаємодій; її можна зберігати, передавати, комбінувати з іншими наборами даних – на відміну від розсіяного емпіричного досвіду.

4. Дозволяє інтегрувати додаткові вимірювані величини. Не лише «сира» ентропія може бути вбудована в клітини суміжної матриці, а й інші пов'язані метрики (ентропія дефектної структури, ентропія пористості, зміни вільної енергії тощо), що робить запропонований метод гнучким.

Очевидними є переваги цього методу порівняно з суто емпіричним вибором варіантів суміші, а саме.

1. Ефективність пошуку та експоненціальне зменшення тестового простору. Емпіричний відбір включає тести великої кількості комбінацій; фільтрація моделей автоматично видаляє пошкоджені ділянки заздалегідь.

2. Організація цілеспрямованих експериментів. Здатність використовувати алгоритми оптимізації (басівська оптимізація, еволюційні алгоритми) для вибору конкретних композицій, що є ефективнішим, ніж «сліпі» перегордки.

3. Надійність і відтворюваність, менше суб'єктивності. Емпіризм значною мірою залежить від місцевого досвіду; Матриця ентропії суміжності є прозорим формалізмом.

4. Обґрунтованість рішень. Відбір можна аргументувати чисельно та уніфіковано (внесок у ентропію, чутливість, передбачувані компроміси).

5. Багатофункціональний характер. Функціональний мультіоб'єкт дозволяє одночасно мінімізувати або максимізувати (залежно від завдання) різні індикатори (міцність, реактивність, кут плавлення, кількість летких речовин тощо), формалізуючи їх як функції одних і тих самих матриць (тензорів) суміжності.

6. Здатність враховувати фізичні та хімічні обмеження, наприклад, термостатичну консистенцію. Модель може включати обмеження, що впливають із CALPHAD через закони збереження, а також фізичні обмеження (наприклад, дозволена пористість, частка летких речовин).

І наприкінці цієї частини дослідження надаймо підсумкову таблицю порівнянь переваг запропонованої математичної моделі.

Як аргументацію на користь працездатності та ефективності запропонованих моделей прогнозування оптимальних за складами багатofакторних сумішей з металургійних відходів наведемо порів-

Таблиця 1

Показники для співставлення вибірних аспектів багатofакторних сумішей розрахунковим та експериментальним методами

Аспект	Математична модель багатofакторних матриць суміжності	Кількість емпіричних або експериментальних варіантів суміші
Охоплення простору композицій	Широкий під час моделювання; інтерактивний	Обмежений практичними тестами
Швидкість пошуку	Швидше за коректними даними (збереження експериментів)	Повільніше, «крок за кроком»
Інтерпретованість	Висока (числові внески)	Низька – досвід, інтуїція
Врахування нелінійних взаємодій	Прямий і формальний	Важко отримати, потрібен великий досвід
Масштабованість	Підтримується математично	Обмежена ресурсами
Ризик статистичної похибки	Потрібна точна оцінка параметрів	Ризик прихованих упереджень із досвіду

няні результати відносно використання запропонованої методики щодо існуючих в науковій літературі варіантів у співставленні з розрахунковими. Вихідні дані для такого співставлення надані в таблиці 2.

Наведемо експериментальні суміші, що обрані для співставлення та їх термодинамічні характеристики:

– суміш $b_{6,11,9} = b_6 + b_{11} + b_9$ (зсушений шлам НВІ + висіяна дрібність НВІ + відсів окатишів) та співвідношенням компонентів (60% + 10% + 30%) [6]. Інтегральна ефективність суміші $Q=0,45$ од.

– суміш $b_{7,3,1} = b_7 + b_3 + b_1$ (окалина металургійна + пил після очистки доменних газів + бентоніт) (80% + 18% + 1.5%) [5]. Інтегральна ефективність цієї суміші $Q=0,67$.

– суміш із формулою $b_{4,1,12} = b_4 + b_1 + b_{12}$ (шлам конвертерний + відновлювач + бентоніт) (73%+25%+2%) [5]. Інтегральна ефективність цієї суміші $Q=0,311$.

– суміш з формулою $b_{2,7,1} = b_2 + b_7 + b_1$ і процентним відношенням компонентів (43%+55%+2%) [4]. Інтегральна ефективність $Q=0,455$

Альтернативні суміші, отримані за допомогою запропонованої моделі мають сукупні показники, що зведені в таблицю 3. На виході моделі отримуємо розрахункові результати у вигляді найбільш

привабливих сумішей з обраної лінійки металургійних відходів, без визначення порядку та проміжних результатів такого аналізу. Звертаємо увагу на значну більшість розрахункових варіантів сумішей для технологій брикетування, що отримані як оптимальні, в співставленні з експериментальними даними. Ми будемо порівнювати експериментальні та розрахункові суміші по кінцевому показнику $f(x) = Q$ – інтегральної ефективності системи.

На основі аналізу багатокомпонентних сумішей, призначених для виробництва металургійних брикетів, сформулюємо узагальнені результати, які характеризують їх термодинамічну, технологічну та структурну застосовність.

1. Суміш $b_{2,6,9,12}$ демонструє найвищу термодинамічну та технологічну ефективність. Її структура поєднує активний відновник (вуглецевий компонент), високоенергетичний гарячий брикетований залізний осад (НВІ) та стабільні гранулярні фази, що забезпечують стабільність і високу реактивність під час термічної обробки.

2. Суміші $b_{6,11,12}$ та $b_{2,7,9,10}$ характеризуються оптимальним співвідношенням між відновлювальними та плавильними властивостями. Ця комбінація компонентів утворює збалансовані термодинамічні

Таблиця 2

Хімічний склад лінійки металургійних відходів і зв'язуючих речовин, що розглядаються для отримання брикетів певної властивості

b_p	Тип відходу	Основні компон.	$Fe_{>11}$ %	Zn, %	C, %	CaO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Ентропія, Дж/(мольК)
b_1	Бентоніт	Al ₂ O ₃ , CaO, SiO ₂	1-3	-	<0.5	1-4	55-65	15-20	344
b_2	Шлам доменної печі	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , CaO, SiO ₂ , C	40-55	0.5	15-25	3-4	4-7	2-3	138
b_3	Пил від очистки доменних газів	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , C, CaO	25-35	0.5-2	30-40	5-10	10-20	2-3	121
b_4	Шлам конвертерний	FeO, Fe ₂ O ₃ , CaO, ZnO	45-55	2-5	1-3	10-15	6-8	<1	116
b_5	Пил від електродугової печі	Fe ₂ O ₃ , ZnO, PbO, CaO	30-40	10-25	2-4	5-10	5-8		95,1-105
b_6	Зсушений шлам НВІ*	Fe (мет.), FeO, C	70-75	<0.1	2-3	1-3	2-4	<1	77,5
b_7	Окалина метал-лургійна	FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe (мет.)	65-75	<0.1	-	7-8	2-3	3-4	70,4-72,4
b_8	Класифікацій-ний пил	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , C	65-75	-	<0.3	1-2	3-4	1-2	41,2
b_9	Відсів окатишів	FeO, Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO	60-70	-	<0.3	1-2	2-3	<0.6	39,0
b_{10}	Ремет-частинки	Fe (мет.), FeO, Fe ₃ O ₄	80-90	-	<0.5	1-2	<1	<1	35,0
b_{11}	Висіяна дрібність НВІ	Fe (мет.), FeO	70-80	-	1-2	1-2	1-2	<0.6	28,8
b_{12}	Відновлювач	C (аморфн., фиксов.)	-	-	70-85	2-5	2-4		3,4

*- гаряче брикетоване залізо

Підсумкові дані щодо ранжування оптимальних складів сумішей для виробництва металургійних брикетів за областями їх технологічного призначення.

Технологічне призначення брикетів	Кількість сумішей що застосовується	Середній Е	Кращі суміші за напрямком використання
Відновлення (R)	7	2,1	$b_{2,6,9,12}, b_{6,11,12}$
Плавлення (M)	7	2,0	$b_{2,7,9,10}, b_{3,5,9,10}$
Агломерація (A)	7	2,0	$b_{1,2,7,11}$
Флюкс (F)	6	1,9	$b_{4,7}, b_{4,5,7}$
Підсумкове ранжування кращих сумішей			
Мітка суміші	Інтегральна ефективність, Q, од.	Пріоритетне призначення Суміші	
$b_{2,6,9,12}$	8,5	Відновлення та плавлення	
$b_{6,11,12}$	7,2	Редукційно-структурна	
$b_{2,7,9,10}$	6,6	Плавильно-відновлювальна	
$b_{2,7,12}$	6,1	Редукційна	
$b_{2,8,10,12}$	6,0	Універсальна з високим $\diamond S$	
$b_{3,5,9,10}$	6,2	Плавильно-редукційна	
$b_{6,9,10,11}$	5,4	Комплексна до агломерації	
$b_{4,1,12}$	5,4	Відновлювально-агломераційна	
$b_{2,7,10}$	4,7	Плавильна проміжкова	
$b_{1,2,7,11}$	4,3	Агломераційна	

профілі, які забезпечують ефективний хід реакцій відновлення при збереженні достатньої плинності шлакової фази.

3. Агломераційні суміші ($b_{1,2,7,11}$ та $b_{6,11,12}$) мають знижений енергетичний потенціал, але демонструють високу структурну стабільність. Це робить їх доречними для виробництва брикетів, спрямованих на формування міцної та термостійкої матриці, особливо в процесах попереднього ущільнення та агломерації дрібних відходів.

4. Флюксуючі комбінації ($b_{4,7}$ і $b_{4,5,7}$) мають мінімальні енергетичні характеристики, але відіграють ключову роль у утворенні шлаку та корекції хімічного складу системи. Їх використання стабілізує фазову рівновагу та регулює кислотно-лужні властивості кінцевого продукту.

Висновок. Запропонований метод є потужним, теоретично обґрунтованим і практично перспектив-

ним інструментарієм для оптимізації багатокомпонентних сумішей щодо отримання металургійних брикетів. За умови точного отримання вхідних даних ентропії, розумного стиснення параметрів (низькорангові представлення), параметризації температури та інтеграції з експериментальним дизайном, метод пропонує значні переваги над «чисто емпіричним» підходом: зменшення кількості експериментів, підвищення відтворюваності, кількісне інтерпретування взаємодій і можливість багатокритерійної оптимізації. Можливі недоліки – це низькі показники взаємодії та стрибкообразні зміни параметрів, які можна компенсувати за допомогою регуляризації, DoE та активної генерації даних. Цю методику можна ефективно використовувати як попереднє дослідження для подальших об'єктивних багатфакторних експериментів і завдань, де кожен тест є дорогим і дорогим.

Література

1. Волошин В. С., Ткаленко І. Методика оцінки взаємодії металургійних відходів при їх рециклінгу. Вчені записки Таврійського університету ім. В. І. Вернадського. Т.36(75), № 4, Ч.1, 2025. С. 191-199.
2. Волошин В. С. Використання металургійних відходів для виробництва геополімерів. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення. Зб. наук. статей. УкрНДІЕП, Харків, 2025. С. 109-116.
3. Волошин В. С., Бурко В. А. Термодинамічний підхід та використання резонансної енергії для мінімізації відходів у харчовій промисловості. ВІСНИК ХНТУ № 2(93), Інженерні науки. Ч. 1, 2025 р. 25-32с.
4. Tkalenko I, Kovtun O., Koriuchev N., Platonov L., Shehovsov D. Recovery of Zn from Auger Press Briquettes Made from Steelmaking Sludge. European Journal of Engineering and Technology Research Vol 8 2023. P.73-91.

5. Vitikka O., M. Iljana M., Heikkilä F., Tkalenko I., Kovtun J., Koriuchev N., Shehovsov D., Fabritius T. Effect of Biocarbon Addition on Metallurgical Properties of Mill Scale-Based Auger Pressing Briquettes. ISIJ International. The Iron and Steel Institute of Japan; Vol. 64, No. 6, 2024. – P. 964–977.
6. Lohmeier L., Thaler C., Harris C., Wollenberg R., Schröder H.-W. Briquetting of Fine-Grained Residues from Iron and Steel Production Using Organic and Inorganic Binders, Steel Research International (Wiley-VCH), 2020. – P. 1–10.

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026